

**П. Марущак, канд. техн. наук; В. Гладь, канд. техн. наук;
І. Коноваленко, канд. техн. наук**

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

КІНЕТИКА ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ СТАЛІ 25Х1М1Ф НА МАКРО-, МЕЗО- ТА МІКРОРІВНІ

Досліджено закономірності накопичення пошкоджень на макро-, мезо- і мікрорівні, у вершині втомної тріщини, за низькочастотного циклічного навантаження. Циклічне навантаження спричиняє зміну мезоскопічних субструктур на поверхні зразка з теплостійкої сталі 25Х1М1Ф, формуючи деформаційні домени, що визначають кінетику втомного руйнування сталі.

P. Maruschak, V. Hlado, I. Konovalenko

KINETICS OF FATIGUE FRACTURE OF 25Kh1M1F STEEL ON MACRO-, MESO- AND MICROLEVELS

Investigated the law of accumulation of damages in macro, meso- and micro levels near the fatigue crack tip at a low cyclic loading. The cycling loading draws the change of mes scope substructures on the surface of heat resistance 25Kh1M1F steel, forming crimp blast-furnace that delineate kinetics of fatigue fracture of steel.

Механіка суцільного середовища розглядає поведінку деформівного твердого тіла під час навантаження на основі інтегральних характеристик середовища. Згідно з таким підходом не враховується внутрішня структура матеріалу, тензори напружень та деформацій вважають симетричними, пластичне деформування матеріалу розглядають лише як трансляційний рух дефектів під впливом напружень [1,2].

Водночас для опису деформівної поведінки матеріалу на мікрорівні широко застосовують теорію дислокацій, що дозволяє описати поширення тріщини у вигляді зміни дислокаційних ансамблів та дати фізичну інтерпретацію феноменологічних закономірностей, виявлених на макрорівні [1,2].

На даний час активно розвивається комплексний підхід до опису даних процесів на мезоскопічному масштабному структурному рівні, де носієм пластичного деформування в матеріалі є об'ємний структурний елемент (мезооб'єм). Це особливо важливо для полікристалічних тіл, оскільки під час навантажування на їх поверхні формуються мезоструктури, аналіз кінетики зміни яких є основою вивчення закономірностей деформування та втомного руйнування, а фізична природа може бути описана за підходами теорії дислокацій [3-6].

Метою даної роботи є розробка підходів вивчення деформування та руйнування полікристалічного на мікро-, мезо і макрорівні.

Методика досліджень

Експериментальні дослідження мезоскопічних механізмів втомного руйнування сталі 25Х1М1Ф проводили за умов низькочастотного навантажування на призматичних зразках з втомною тріщиною. Середній розмір зерна сталі 25Х1М1Ф становив 50 мкм, межа текучості – 750 МПа, межа міцності 850-870 МПа, мікротвердість H_{μ} =1780 МПа, відносне видовження 16-17 %.

Методом електрохімічного контурного травлення на бічну поверхню зразків наносили сітку точок діаметром 0,02 мм із чітким контуром та кроком 0,1 мм [7]. Режими електрохімічного контурного травлення ділильної сітки на поверхні сталюго зразка типу 25Х1М1Ф, вибирали з умови одержання точок сталої форми, табл. 1.

Марка матеріалу	Площа робочої ділянки зразка, дм^2	Режим травлення		
		Густина струму, А/дм^2	Час протікання струму, хв	Температура реалізації процесу, $^{\circ}\text{C}$
25Х1М1Ф	0,1	1,54	2	70

Тріщиностійкість сталі 25Х1М1Ф досліджували при частоті 0,1 Гц. Фотографували окіл вістря тріщини за різних значень КІН. Деформацію оцінювали диференціюванням горизонтальної та вертикальної складових векторів переміщень. Поздовжню ε_{xx} , поперечну ε_{yy} , зсувну ε_{xy} деформації та поворотний компонент тензора дисторсії оцінювали за переміщеннями базових точок [2].

Мікробудову поверхні руйнування в напрямку поширення втомної тріщини та з бічної поверхні зразків досліджували на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И.

Макрозакономірності поширення втомної тріщини

Основні закономірності поширення втомної тріщини в сталі 25Х1М1Ф в межах середньоамплітудної ділянки описано рівнянням Паріса. Виявлено лінійне зростання макрошвидкості росту втомної тріщини (РВТ) при представленні даних в подвійних логарифмічних координатах, рис. 1. Макроаналізом встановлено зростання розміру та неоднорідності пластичного деформування у вершині втомної тріщини, що проявлялось у вигляді зростання матовості поверхні за бічного освітлення зразка. Мікрошвидкість втомної тріщини визначали за кроком втомних борозенок.

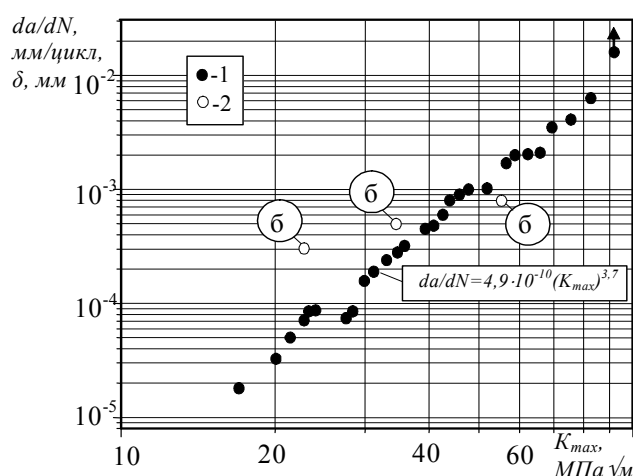


Рисунок 1 - Залежність макро – (1) і мікрошвидкості - (2) РВТ від значень K_{max} в сталі 25Х1М1Ф

Характерною особливістю початкового етапу деформування, при $K_{max}=24$ МПа√м, є його неоднорідність у вигляді слабodeформованих зон розміром 50-100 мкм на фоні формування інтенсивного деформаційного рельєфу. Із збільшенням КІН вище $K_{max}=36$ МПа√м ці зони також починають деформуватись, поступово зливаючись із раніше пошкодженим матеріалом. При $K_{max}=55$ МПа√м, поверхня зразка набуває чисельних пошкоджень у вигляді темних смуг, зумовлених локальним деформуванням. На межах недеформованих областей утворюються складки та мікротріщини.

Результати досліджень

Виявлено, що під час поширення втомної тріщини виникає узгоджене деформування груп зерен, яке зумовлене виникненням двох систем ковзання [3]. Блоки деформованих зерен вважали об'ємними мезодефектами – деформаційними доменами

зародженими в зонах локалізації пластичних зсувів. Вони зміщуються за схемою “зсув+поворот” [1,3,4]. Карта векторів переміщень елементарних ділянок деформованої поверхні та розподіл переміщень попереду вістря втомної тріщини за різних коефіцієнтів інтенсивності напружень подані на рис. 2.

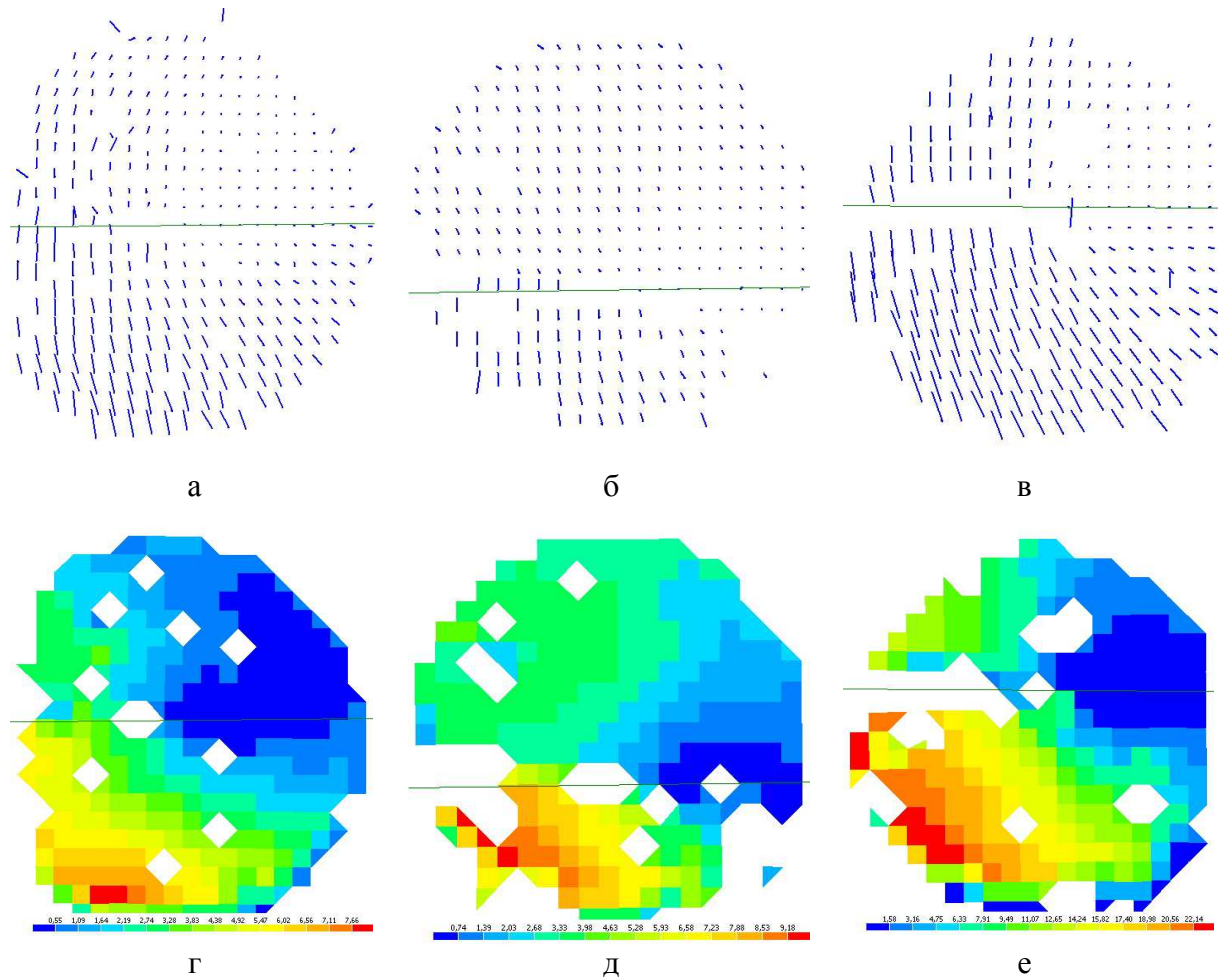


Рисунок 2 - Карта векторів переміщень (а-в) елементарних ділянок деформованої поверхні та розподіл переміщень (г-е) попереду вістря втомної тріщини за $K_{max}=24 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ – а, г; $K_{max}=36 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ – б, д; $K_{max}=55 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ – в, е

Аналіз розподілів поворотів і накопиченої пластичної деформації свідчить про виникнення ієрархії локалізованої деформації і поворотів, подрібнення смуг локалізованого деформування і поворотів на дрібніші складові, в яких значення локальних деформацій значно перевищують її середнє значення [3].

Найбільш інтенсивно пластичне деформування матеріалу відбувалось в областях локалізованого різномасштабного течіння матеріалу поблизу концентраторів напружень та структурних елементів з мінімальною міцністю. Оточуючий матеріал деформований лише до величини акомодатії пластичного течіння. В околі зони руйнування пластична деформація мезооб’ємів неоднорідна, характерним елементом деформаційного рельєфу є мікротріщини, зумовлені вичерпуванням пластичності меж розділу ферит-цементит. Деформація, що передуює утворенню мікротріщин, залежить від виду напруженого стану, зміцнює та водночас розпушує метал, що зумовлює об’ємні зміщення матеріалу в околі вершини втомної тріщини. Траєкторія втомної тріщини визначається міждоменними межами, розміщеними нормально до осі прикладання сили. Під час циклічного деформування деформаційні домени орієнтуються в напрямку осі навантажування.

На мезорівні магістральна тріщина поширювалась за схемою “зсув-поворот-відрив”, подібною до схеми “зсув-відрив” [3,4]. Деформаційні домени переміщуються

за схемою “зсув+поворот”, а суміжні з берегами тріщини елементи мезоструктури зміщуються в напрямку навантажування за механізмом нормального відриву [1,3,4]. Ділянки з високою густиною полос ковзання мають незначну величину деформування, в них не виявлено тріщин, оскільки відбулась релаксація та перерозподіл напружень ї по об’єму перлітних зерен.

За $K_{max}=24 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ смуги ковзання є короткими та ущільненими, що спричиняє численні гілкування тріщини, збільшуючи тріщиностійкість матеріалу. На окремих ділянках спостерігали виникнення смуг ковзання внаслідок галуження тріщин. Це розорієнтовує домени в околі вершини тріщини, рис. 2 а, г. Накопичення пошкоджень утворює вільну поверхню в околі вершини магістральної тріщини за механізмом “зсув+поворот”.

При $K_{max}=36 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ в околі вершини тріщини формується трикутна зона пластичного витягування, рис. 2 б, д. Тріщина при цьому поширюється затупленням внаслідок значних пластичних деформацій та проростанням з утворенням вільної поверхні попереду тріщини внаслідок сукупності пластичних зсувів в напрямку максимальних дотичних напружень.

Із зростанням КІН до $K_{max}=55 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ межі зони витягування зорієнтовуються під кутом 45^0 та 135^0 до осі навантаження, рис. 2 в, е. Мезодефекти зсуваються до вершини тріщини за даними межами. Це зумовлено перевантаженням зразка внаслідок наближення напружень матеріалу до межі текучості. Циклічне деформування матеріалу попереду вістря втомної тріщини сприяє накопиченню дефектів структури. Внутрішньозеренні трансляційні потоки деформаційних дефектів утворюють трансляційно-ротаційні вихори конгломератів деформованих зерен. Коли трансляційно-ротаційна структура охоплює весь переріз зразка, в даних смугах зароджуються мікротріщини, які сприяють проростанню магістральної тріщини [4,6].

Мікромеханізми руйнування

Фрактографічним аналізом зламів зразків встановлено мікромеханізми втомного руйнування матеріалу. На фрактограмах помітно, що тріщина поширювалась переривчасто (зигзагоподібно) за елементами макроскопічної структури, що й визначає характер поверхні руйнування (рис. 3 а,в,д).

Для кожної ділянки діаграми притаманний характерний рельєф, зумовлений механізмами РВТ. Так, для усталеного РВТ характерні втомні борозенки (рис. 3 г), а за високих значень розмаху КІН поєднання борозенок і ямок (рис. 3 е), що свідчить про злиття пор в матеріалі. Втомні борозенки поширюються по багатьох плоских терасах, які розділені між собою гребенями. Наявність різноорієнтованих терас в площині втомного руйнування пов’язана зі зміною орієнтації головної площини руйнування в кожному зерні [8,9]. Для низьких значень КІН менше $24 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ характерне формування втомних борозенок з малим кроком (рис. 3б). Наявні в структурі зламу вторинні тріщини, орієнтовані в перпендикулярному напрямку, є нечисельними і слабо розвинутими. В межах фасетки втомного зламу борозенки мають близький за значенням крок. На бічній поверхні зразка помітне незначне гілкування тріщини та відсутність пластичної деформації (рис. 3а). Втомні борозенки не мають строго фіксованої величини вздовж всього фронту тріщини, що викликане нерівномірністю підростання втомної тріщини по фронту в різних зернах [10].

Із зростанням КІН до $36 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ збільшується крок втомних борозенок та з’являються чітко виражені вторинні мікротріщини (рис. 3г). Фрактографічний аналіз зламів виявив особливості впливу пластичних деформацій на структуру руйнування: мікрорельєф зразків має характер в’язкого, досить енергомісткого руйнування. Крім того, виявлено локалізоване гілкування тріщини, яке приводить до уповільнення РВТ, із її наступним стрімким підростанням після повернення тріщини в магістральне русло (рис. 3в).

За високих швидкостей РВТ у вершині тріщини на поверхні руйнування утворюються ямки відриву та втомні борозенки з великим кроком (рис. 3е). Бічна поверхня на такій ділянці тріщини характеризується значною залишковою пластичною деформацією та істотним розкриттям вторинних мікротріщин (рис. 3д). Пластична деформація у вершині тріщини, а також зростання концентрації мікрodefектів і мікротріщин на пластично деформованих ділянках свідчить про значний вплив пластичних деформацій на розвиток пошкоджуваності та істотну енергомісткість руйнування [10].

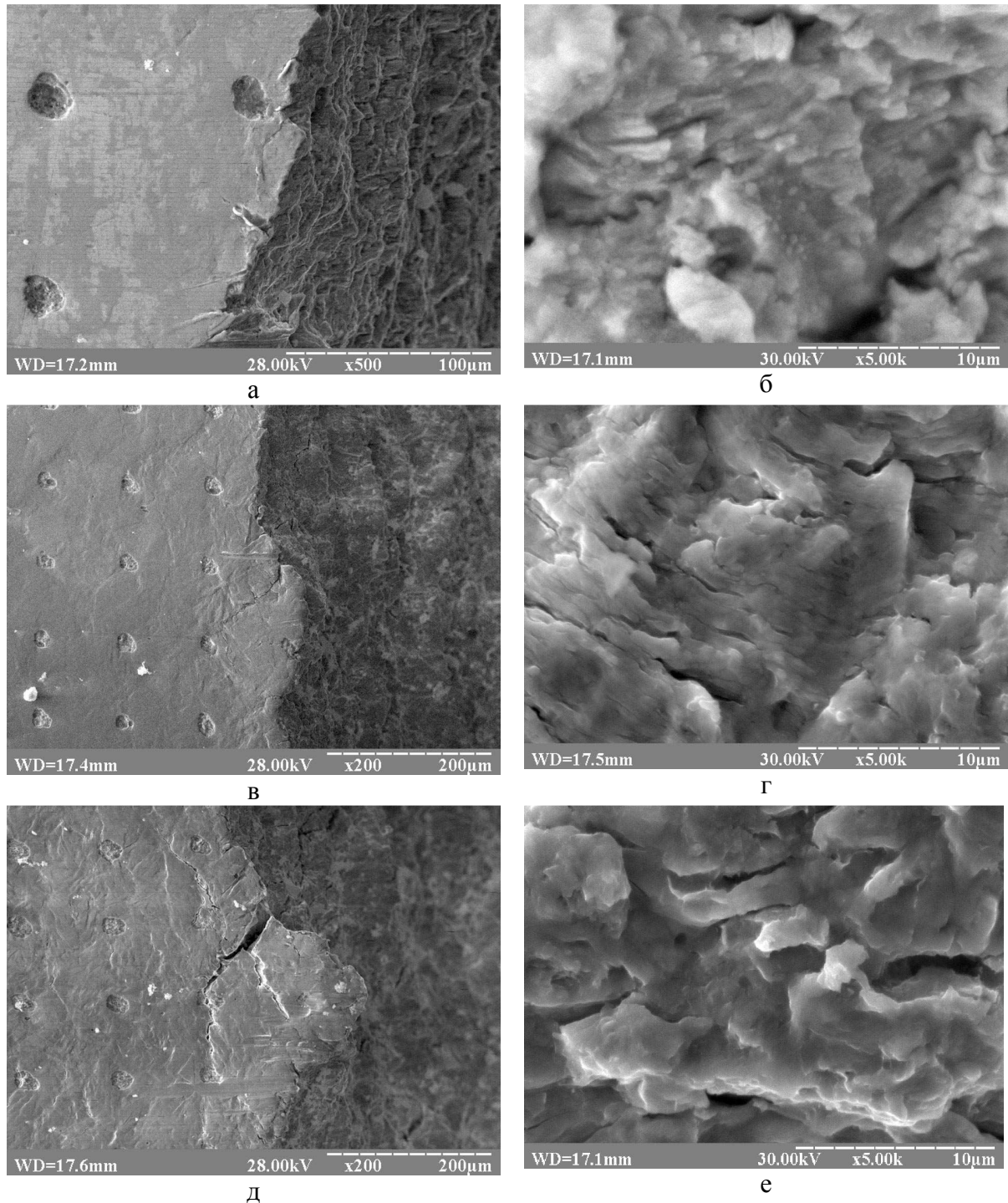


Рисунок 3 - Мікромеханізми втомного руйнування сталі 25X1M1Φ: а, б за $K_{max}=24 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, в, г при $K_{max}=36 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; д, е при $K_{max}=55 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; а, в, д – бічна поверхня зразків; б, г, е – поверхня втомного руйнування

Змінюється характер впливу дисперсних включень. Якщо для низьких значень КІН включення в фериті сприяють пластичному деформуванню матриці, підвищуючи тріщиностійкість, то для великих КІН вони, потрапляючи в пластичну зону,

руйнуються, утворюючи великі ямки, активізуючи процес просування тріщини. У більшості випадків було виявлено специфічну мікробудову ямок, якій властиве видовження бічних поверхонь. При цьому ці ямки набувають вигляду видовжених еліптичних западин з помітною складчастою терасовою будовою, часто з включеннями на їх дні (ймовірно карбідними). Діаметр цих ямок переважно не перевищує 2 мкм. Мікробудову поверхні зламу цих областей руйнування зображено на рис. 3е. В останньому випадку став помітним дуже швидкий перебіг процесу відриву, доповнений декогезією матеріалу на межах зерен.

Значні деформації в тілах зерен, попереду вістря тріщини сприяють локалізації деформування, що спричиняє до збільшення джерел руйнування, утворення вторинних мікротріщин. Тобто в зоні пошкоджуваності біля вершини тріщини відтворюються всі процеси зародження мікроефектів, відомі з теорії дислокацій, проте це відбувається за високих градієнтів напружень та деформацій та складного напруженого стану. Отже, пластична зона стабілізує тріщину, створюючи передумови для її подальшого поширення.

Висновки

Отримано експериментальні залежності макро- і мікрошвидкості РВТ ферито-перлітної сталі 25Х1М1Ф від розмаху КІН за умов низькочастотного циклічного навантажування.

На основі фотографій переміщення базових точок проаналізовано деформації та поворотний компонент тензора дисторсії. Встановлено, що на мезорівні рух магістральної тріщини відбувається за схемою “зсув-поворот-відрив”, подібною до схеми “зсув-відрив”. Траєкторія втомної тріщини визначається міждоменними межами, розміщеними нормально до осі прикладання сили. Із зростанням КІН межі зони витягування зорієнтовуються під кутом 45^0 та 135^0 до осі навантаження, а трансляційно-ротаційна структура охоплює весь переріз зразка, що викликає зародження в даних смугах мікротріщин, які сприяють проростанню магістральної тріщини.

Фрактографічними дослідженнями сталі 25Х1М1Ф виявлено формування втомних борозенок на плоских терасах, орієнтація яких зумовлена головною площиною руйнування в зернах. Із зростанням швидкості РВТ збільшується крок втомних борозенок та з’являються вторинні мікротріщини, змінюється мікроефект втомного руйнування - мікрорельєф зламів формується з ямкового рельєфу і втомних борозенок. На бічній поверхні зразків із збільшенням швидкості РВТ виявлено збільшення залишкової пластичної деформації та розкриття вторинних мікротріщин.

Наведені результати дозволяють ефективно оцінювати накопичення втомних пошкоджень у вершині втомної тріщини, що, в свою чергу, сприяє підвищенню точності оцінки тріщиностійкості конструкційних матеріалів та прогнозуванню тримкої здатності за різних типів напружено-деформованого стану.

Роботу виконано за кошти Державного фонду фундаментальних досліджень, номер проекту 0107U006982.

Література

1. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. Панина В.Е. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1. – 298 с., Т. 2. – 320 с.
2. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунины А.А. и др. Синергетика и фракталы в материаловедении. - М.: Наука, 1994.-363 с.
3. Панин В.Е., Панин С.В., Мамаев А.И. Деформационные домены на мезоуровне в деформируемом твердом теле // Физика металлов и материаловедение.- 1997. -Т. 83.- № 3.-С. 121-127.
4. Любутич П.С., Панин С.В. Исследование точности и помехоустойчивости построения векторов перемещений при оценке деформаций оптико-телевизионным методом // Вычислительные технологии. 2006.-Т. 11.-№ 2.-С. 52-66.

5. Смолин И.Ю., Бакеев Р.А., Макаров П.В. Численное решение некоторых двумерных задач для упругопластической микрополярной среды // Математ. моделир. систем и процессов: межвуз. сб. науч. тр. - Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та.-2007.-№1-С. 142-150.
6. Кириченко М.С., Смолин И.Ю., Панин С.В. Метод анализа эволюции картин разрушения нагруженного мезообъема для идентификации формирующихся фрагментов // Вычислительные технологии.-2008.-Т. 13.-№ 1.-С. 71-87.
7. Патент України № 33067 Спосіб розмічування поверхні металевих плоских зразків / Ясний П.В., Пиндус Ю.І., Марущак П.О., Фостик В.Б. Заявлено 4.02.2008; Опубліковано 10.06.2008, Бюл. № 11.
8. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение.-Челябинск: Металлургия.-1988.-440 с.
9. Фрактография и атлас фрактограмм / Справ. изд. Пер. с англ. / Под. ред. Дж. Феллоуза. – М.: Металлургия, 1982. - 490 с.
10. Ясний П.В., Марущак П.О. Микромеханизмы усталостного разрушения стали 25Х1М1Ф // Труды II Международной научно-технической конференции “Современные проблемы машиностроения” (8-10 октября) – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. –С. 90-93.

Одержано 01.08.2008 р.